

doi: 10.12029/gc20180404

梁光河. 2018. 海南岛的成因机制研究[J]. 中国地质, 45(4): 693–705.

Liang Guanghe. 2018. A study of the genesis of Hainan Island[J]. Geology in China, 45(4): 693–705(in Chinese with English abstract).

海南岛的成因机制研究

梁光河^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100029)

摘要:海南岛是位于华南地块南部的一个相对独立地块,其成因机制有多种说法。本文基于地理地貌、地层、断裂带、岩浆岩、矿带分布、地震勘探剖面、古生物,以及环绕海南岛的 3 个盆地的成因等诸多证据的系统分析研究,结果表明海南岛是从北部湾旋转分离出去的,从原始位置逆时针旋转了约 150°达到当前位置。其分离起始时间大约起始于 65 Ma,旋转漂移主期发生在 40~24 Ma,目前还在整体向东南方向漂移同时伴随着逆时针旋转。海南岛的成因机制和印度板块与欧亚板块的碰撞过程密切相关,动力机制是印支地块的大规模挤出和旋转带动了海南岛从华南的裂离和旋转漂移。本研究为该碰撞过程的构造演化阶段性时限提供了远程约束。同时也对海南岛的成矿区带研究具有一定指导意义。

关键词:海南岛成因;印度欧亚碰撞;地块旋转;印支地块

中图分类号:P542

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2018)04-0693-13

A study of the genesis of Hainan Island

LIANG Guanghe^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mineral Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100029, China; 2. Institute of Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Hainan Island is a relatively independent block located in the southern part of the South China Block. There exist many viewpoints for its origin. This paper is based on the systematic analysis of many pieces of evidence such as geographic geomorphology, strata, fault zone, magmatic rock, ore belt distribution, seismic exploration profile, paleontology, and genesis of three basins surrounding Hainan Island. The results show that Hainan Island was separated from Beibu Gulf and rotated about 150° counterclockwise from the original position to the current position. The starting time for the separation is about 65 Ma, and the main rotation drift occurred at 40–24 Ma. At present, it is still drifting toward the southeast and is accompanied by counterclockwise rotation. The genesis of Hainan Island is closely related to the collision process between the Indian Plate and the Eurasian Plate. The

收稿日期:2018-04-12;改回日期:2018-05-18

基金项目:国家重点研究计划“深地资源勘查开采”重点专项项目“北方增生造山成矿系统的深部结构与成矿过程”(2017YFC0601204)和国家重大科研装备研制项目“深部资源探测核心装备研发”子项目“金属矿地震探测系统”(ZDY2012-1-06)资助。

作者简介:梁光河,男,1965年生,副研究员,从事矿产资源勘查、大地构造和地震成因机制研究;E-mail: lgh@mail.iggcas.ac.cn。

dynamic mechanism is that the large-scale extrusion and rotation of the Indochina block has driven Hainan Island's fission and rotation drift from South China. This study provides remote constraints for the structural evolution of the collision process. At the same time, it also has certain guiding significance for the study of the metallogenic belt in Hainan Island.

Key words: genesis of Hainan Island, India Eurasian collision, block rotation, Indochina block

About the first author: LIANG Guanghe, male, born in 1965, associate researcher, engages in mineral resources exploration, geotectonic and seismogenic mechanism research; E-mail: lgh@mail.iggcas.ac.cn.

Fund support: Supported by the key special project "Deep structure and mineralization process of the northern accretion orogenic metallogenic system" (No. 2017YFC0601204) of National key research project "Deep resources exploration and exploitation" and the subproject "Seismic Exploration System for Metal Deposit" (No. ZDY2012-1-06) of National Major Research Equipment Development Project "Research and development of deep resources exploration core equipment".

1 引 言

海南岛位于南中国海北部大陆边缘的一个地块,地质上其位于印支地块和华夏地块之间(图1),环绕海南岛发育3个新生代含油气盆地(朱伟林等,2008),分别是北面的北部湾盆地、西面的莺歌海盆地和南面的琼东南盆地。关于海南岛的构造演化及成因机制在过去的数十年已经得到了深入研究,但海南岛的大地构造格局和构造体制仍存在不同的认识(许德如等,2003)。主要有两种观点,第一种观点认为海南岛是中生代从冈瓦纳裂解的微陆块向北漂移拼贴在华南地块南部(杨树锋等,1989;Hsu et al. 1990;陈海泓等,1994;殷鸿福等,1999)。第二种观点认为海南岛是华夏地块的一部分,是从古华夏地块分离的微陆块(陈国达,1956;侯威,1992;Metcalf et al. 1993;Replumaz and Tapponnier,2003;张业明等,2005;梁光河,2013)。其中Replumaz and Tapponnier(2003)认为海南岛是从中国的北部湾分离出来的,但没有发生旋转。梁光河(2013)认为海南岛是从北部湾分离漂移而来,并伴随着旋转。目前对海南岛的成因还在争议中。第一种观点证据不够充分;第二个观点证据相对较多,都认为海南岛是华南地块的一部分(万天丰,2011)。但具体从哪里分离?什么时间分离?分离的动力机制是什么?分离发生在哪个深度范围?仍然存在很多不清楚的问题。本文试图回答这些问题。主要基于地形地貌、地质、地球物理、古生物和环绕海南岛的沉积盆地的构造演化,特别是基于北部湾盆地的地震勘探剖面 and 地质构造演化史恢复来说明这个过程,并厘定该演化过程的时

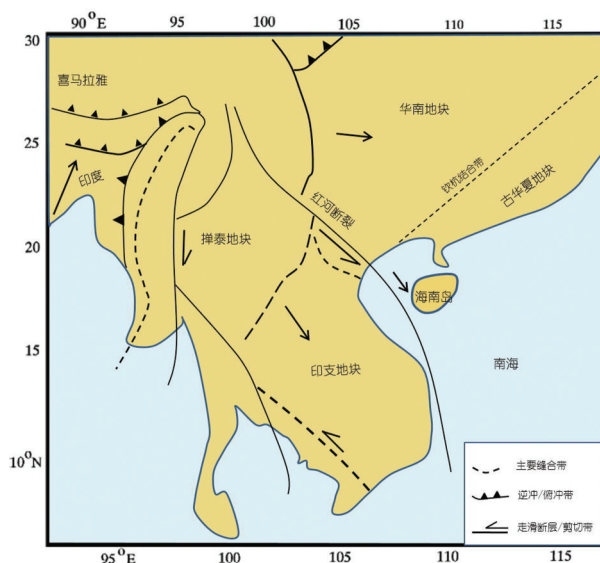


图1 东南亚区域构造简图(改编自Cung and John, 2013; Lelout et al.,2001; Takemoto et al., 2005)
Fig.1 Simplified regional structure of Southeast Asian (modified after Cung and John, 2013; Lelout et al.,2001; Takemoto et al., 2005)

限。所有的系列证据都表明,海南岛是65 Ma开始从北部湾分离漂移到当前位置的,并伴随150°逆时针旋转。

2 地质背景

海南岛最老的地层为中元古界,也存在古生代、中生代及新生代地层。海南岛岩浆岩分布广泛,中南部主要发育中生代花岗岩,北部发育大量新生代玄武岩。其构造主要有北部呈东西向的王五一文教大断裂和中南部主要呈北东方向分布的构造断裂带。环绕海南岛分布3个新生代含油气盆地。

海南岛的成因机制与印支地块和华夏地块的构造演化密不可分。这个构造演化过程和印度板块-欧亚大陆碰撞相关,在这个碰撞过程中,相关的很多地块发生了漂移和旋转。目前针对印支地块研究程度较高,关于印支地块的构造演化至少存在4种模式。这4种模式给出了印支地块沿哀牢山-红河断裂系统不同的旋转和位移模式(Lee and Lawver, 1995; Hall, 2002; Replumaz and Tapponnier, 2003; Royden et al. 2008)。这些模式都支持印支地块的挤出和逃逸,只是具体细节上有差异。Replumaz and Tapponnier(2003)的模式明确指出,海南岛在古近纪还位于华南地块的北部湾,新近纪才从华南地块分离,但几乎没有旋转。事实上,大陆板块漂移过程中存在大规模旋转并非罕见,如古地磁测量表明印度板块在过去的180 Ma至今发生了大约60°的旋转,漂移距离超过6000 km(Gary, 2013)。印度板块与欧亚板块碰撞过程中,引发相关的很多陆内地块都发生了不同程度的旋转,Avouac and Tapponnier (1993)发现,可以用4个旋转地块模型来描述中亚当前速度场变形特征。Li et al.(2017)更新了印支地块的挤出和旋转的动力学恢复过程。Wang et al. (2014)的研究说明随着这个挤出过程,四川盆地也发生了逆时针旋转。更多的研究表明,印支地块在印度欧亚碰撞过程中发生了大规模走滑移动并伴随着旋转(Tapponnier et al.,1982; Yang and Besse, 1993; Leloup et al.,1995; Chung et al.,1997; 任纪舜

等,1996, Morley,2012; Li et al., 2017)。杨振宇等(1998)根据古地磁的研究表明,印支地块自晚白垩世以来,相对于中国东部向南东滑移量达(1200±460)km,同时伴随着15°左右的顺时针旋转。这个运动过程怎样改变海南岛的位置?是否也使得海南岛这个微陆块发生了旋转漂移?

本文通过收集大量前人的研究成果,进行系统分析解释。结果表明印度板块的北漂不但造成了与欧亚的碰撞形成了青藏高原隆升,而且也间接地影响了华南的陆块裂离,使得海南岛从华南分离。诸多证据表明海南岛是从北部湾分离旋转漂移到当前位置的。这些证据主要包括4个方面,分别是地形地貌、地质、地球物理和环绕海南岛的沉积盆地。这里笔者先给出相关证据,最后讨论其成因机制。

3 地形地貌证据

将海南岛顺时针旋转150°并北移到北部湾,得到如图2的地形地貌复原图,特别注意图中红色箭头所指处越南北部沿海岛屿的地貌特征,这些岛屿好像被刷子刷过一样,推测它们是海南岛旋转漂移过程中所造成的一种自然现象。图3为根据中国山脉分布地图得到的海南岛当前山脉走向图和复原图,图中左侧的海南岛五指山在右侧复原图中与华南的云开大山走向一致,也说明海南岛可能是从华南大陆分离旋转漂移到当前位置的。

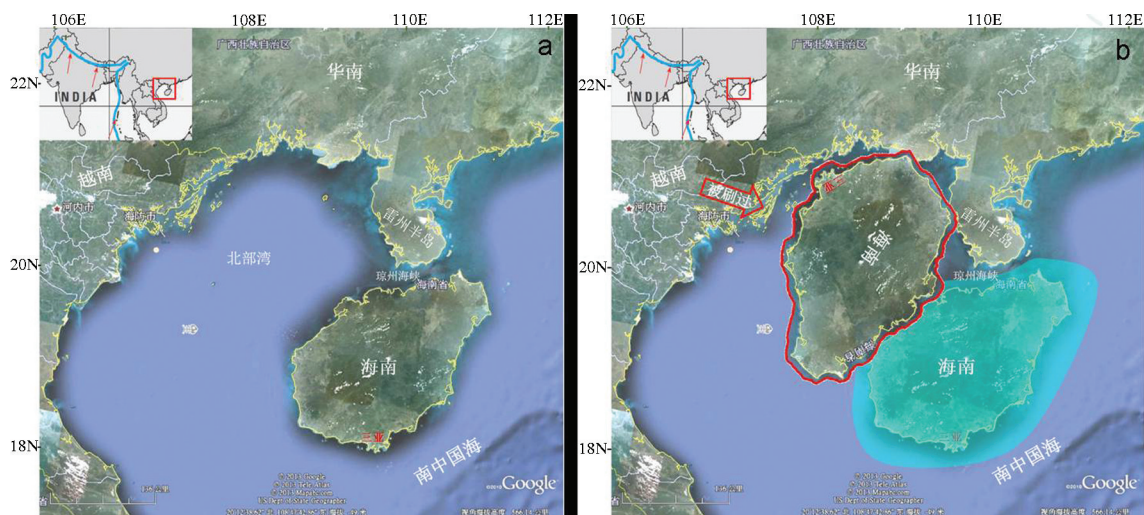


图2 海南岛当前位置(a)及海南岛复原后的位置(b)(改自 Google Earth)

Fig.2 The current location of Hainan Island (a) and the restored location of Hainan Island (b) (modified from Google Earth)

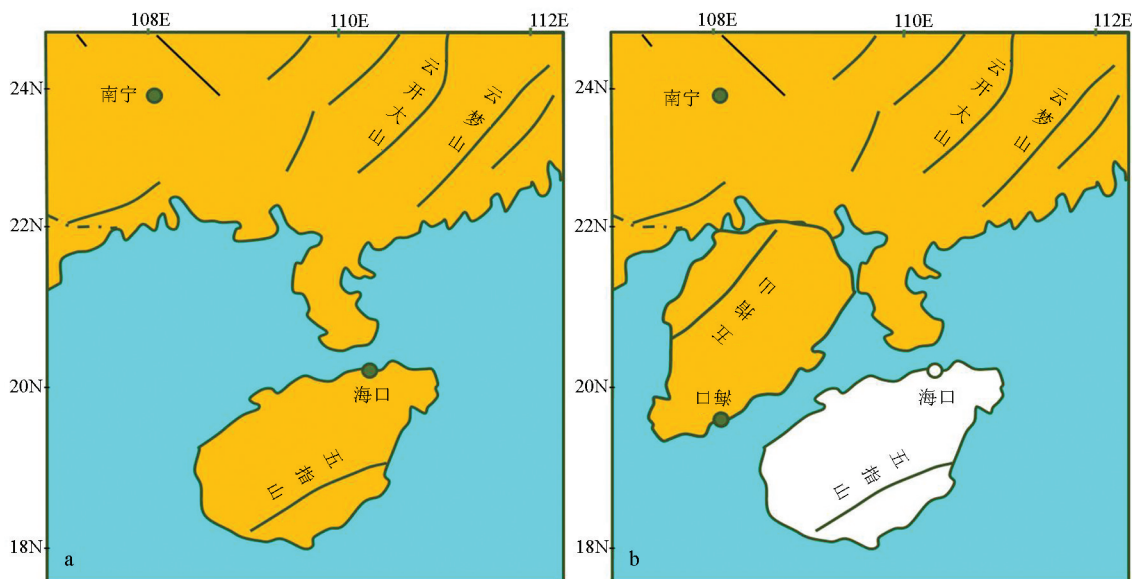


图3 海南岛当前山脉图(a)及海南岛山脉复原图(b)(复原后五指山与华南的云开大山走向一致,修改自马丽芳,2002)
Fig.3 Current mountain range map (a) of Hainan Island and the restoration map of Hainan Island (b). The Wuzhi Mountain after restoration is consistent with the Yunkaishan Mountain in South China (modified from Ma Lifang, 2002)

4 地质证据

以上地块恢复不是随意的,主要是基于地质证据的吻合。地质证据主要包括地层、断层、岩浆岩和成矿带,这些证据进一步支持海南岛是从北部湾分离漂移到当前位置的。图4是从中国1:500万地质图上截取的海南岛的区域地质图及将海南岛复原后的结果。从该图可以看出海南岛复原后,海南岛与华南的志留纪地层对应良好,特别是3条断裂非常吻合,岩浆岩分布也吻合很好,其中绿色的是新生代玄武岩,红色和粉红色是中生代花岗岩。图5是海南岛复原后的成矿带分布图,可以看出海南岛的主要铁、金成矿带与华南的铁、金成矿带吻合良好,而且海南岛的铝土矿与华南雷州半岛上的铝土矿带也完全吻合。图6中也标出了著名的海南岛石碌铁矿复原后的位置。余金杰等(2012)在探讨海南岛与俯冲有关的弧岩浆活动、同碰撞岩浆活动和与后碰撞有关的岩浆活动基础上,认为海南岛海西—印支期花岗岩可与北越南海西—印支期花岗岩进行对比。

海南岛的植物分带和鸟类分带研究也说明海南岛曾经与广西华南和越南相连(Zhu, 2016; Xu et al., 2017)。也就是说海南岛是从北部湾分离漂移出去的。海南岛上也曾存在许多非本土动物,如海

南黑长臂猿、亚洲象、黑熊和华南虎等。三亚落笔洞古人类遗址中就发现了多处动物骨骼遗迹,如亚洲象、中国黑熊、华南虎、獐、豹、豺等(颜家安, 2006)。说明海南岛曾经和大陆相连,因为一个孤立的海岛不可能进化出这些大型动物。

5 地球物理证据

如果海南岛真的是从北部湾分离旋转漂移到当前位置的,必然会在北部湾留下确凿的证据。中国海洋石油总公司在南海的北部湾地区做过大量的地震勘探,并钻探了很多石油钻井,具有很翔实的资料。图6最上部是一个典型的北部湾盆地石油地震勘探剖面,走向北西—南东。对该剖面的地质构造演化史恢复(李春荣等, 2012)表明:早期(65~40 Ma)发育伸展断裂并伴随微弱旋转,说明海南岛从北部湾的分离起始于65 Ma;中期(40~24 Ma)发育大规模走滑伸展断裂,并伴随高强度旋转,这可以从该时期产生的大量负花状断裂系统得到证明。这说明海南岛在这个时期发生了大规模旋转漂移,进一步脱离华南;后期(24~0 Ma)分离和旋转强度明显减弱,北部湾盆地主要表现为伸展下沉,沉积速率增大,断裂活动微弱,说明海南岛在该阶段进一步向南东方向发生漂移,但没有明显旋转。

古地磁研究结果表明,从晚白垩世开始,海南

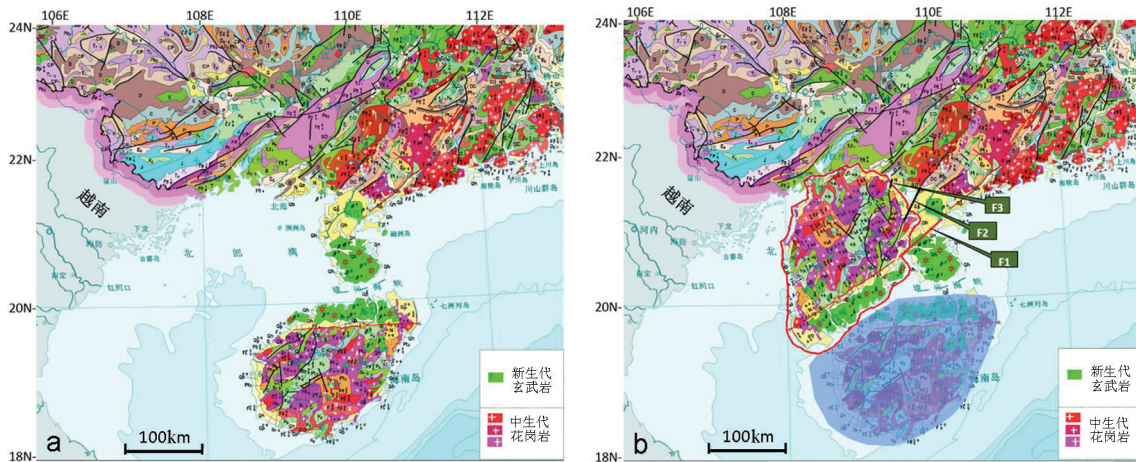


图4 海南岛区域地质图(a)及复原后的区域地质图,图中地层、断层、岩浆岩吻合良好(b)(据程裕淇,2002修改)
 Fig.4 Regional geological map(a); the restored geological map of Hainan Island(b), where the stratigraphy, faults, and magmatic rocks are in good agreement (modified from Cheng Yuqi,2002)

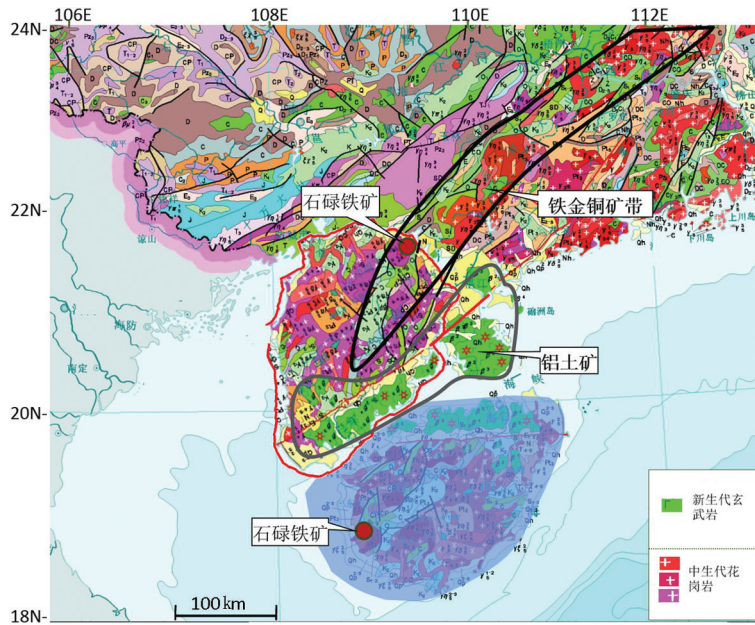


图5 海南岛复原后的成矿带分布图(据程裕淇,2002修改)
 Fig.5 Distribution of the restored metallogenic belt in Hainan Island (modified from Cheng Yuqi,2002)

地块与华南地块分离(汪啸风等,1991)。进一步的古地磁研究说明,海南岛是被印度支那地块拖出,并伴随着 $4.0 \pm 5.8^\circ$ 逆时针旋转(Liu and Morinaga, 1999),也有人对这个逆时针旋转量得出了大约 10° 的不同结论(Li et al.,1995)。这些结论与上述构造演化的恢复大体是一致的,即从 65 Ma 开始海南岛已经脱离华南。杨振宇等(1998)的统计表明,利用古地磁研究印支地块的古纬度平均存在 $\pm 3^\circ$ 的误差

范围,这个误差量转换成距离相当于 ± 333 km 的误差。这说明古地磁在测量海南岛的旋转量上也会存在很大误差,如果按照上述古地磁给出的旋转结果,无论地形地貌、山脉走向、地质层位、岩浆岩、断层分布还是地球物理剖面都得不到吻合,因此本文质疑在这个小岛上古地磁研究是否能够精确恢复其新生代的旋转角度?

由国家地震局 GPS 观测得到的中国大陆现今

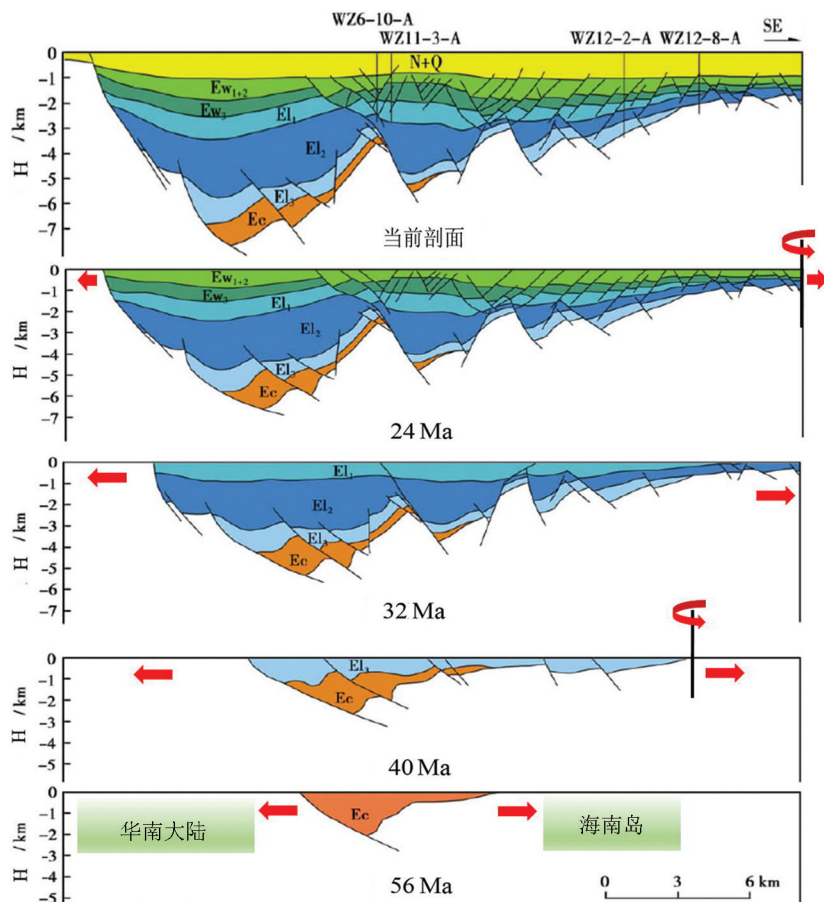


图6 北部湾地震勘探剖面构造发育历史恢复(据李春荣等,2012修改)

Fig.6 Geological history restoration of seismic exploration profiles in the Beibu Gulf (modified after Li Chunrong et al., 2012)

地壳运动速度场揭示了海南岛的速度场的运动特征(赵国强和苏小宁,2014),结果说明海南岛正在向东南漂移,但海南岛南部速度稍大于北部,说明当前海南岛在漂移中还伴随着微弱的逆时针旋转。

6 环海南岛的盆地证据

环绕海南岛有3个重要的新生代含油气盆地,它们分别是北部湾盆地、莺歌海盆地和琼东南盆地(图7),其基底主要为前新生代变质岩或火成岩,这3个沉积盆地的构造演化史都支持海南岛的旋转成因。朱伟林等(2008)的研究结果说明,环绕海南岛的3个盆地的构造发育过程是同步的,它们都经历了两个构造演化阶段(图8),大致以24 Ma为界,分别是古近纪的裂陷阶段和新近纪的沉降阶段。但北部湾盆地比其他两个盆地形成较早,多沉积了65~40 Ma的地层,推测海南岛初始裂开过程中是一个张裂环境,先裂开了北部湾盆地,之后海南岛

发生了大规模旋转漂移,同步切割形成了莺歌海盆地和琼东南盆地。

(1)对海南岛北部的北部湾盆地,徐政语等(2014)的研究表明,印欧两大陆拼碰活动为华南大陆南缘向东南逃逸、蠕散以及北部湾盆地右行旋转走滑的成盆环境提供了重要的动力来源。陈长征等(2014)通过砂箱物理模型试验(sandbox modelling technologies),说明北部湾盆地是一个右行旋转走滑盆地。该实验对北部湾盆地迈陈凹陷砂箱物理模拟实验对比,结果表明,对砂箱施加右旋的力,可以得到与三维地震勘探测量得到类似的断裂分布特征(图9)。不过这个模拟虽然模拟了走滑剪切作用,但缺少了同步的拉分模拟,因此还不能得到与实测完全一致的效果。

(2)对海南岛西部的莺歌海盆地,张启明和郝芳(1997)提出右旋拉分成盆模式。李思田和张启明(1997)进一步提出莺歌海盆地在新生代沿红河断

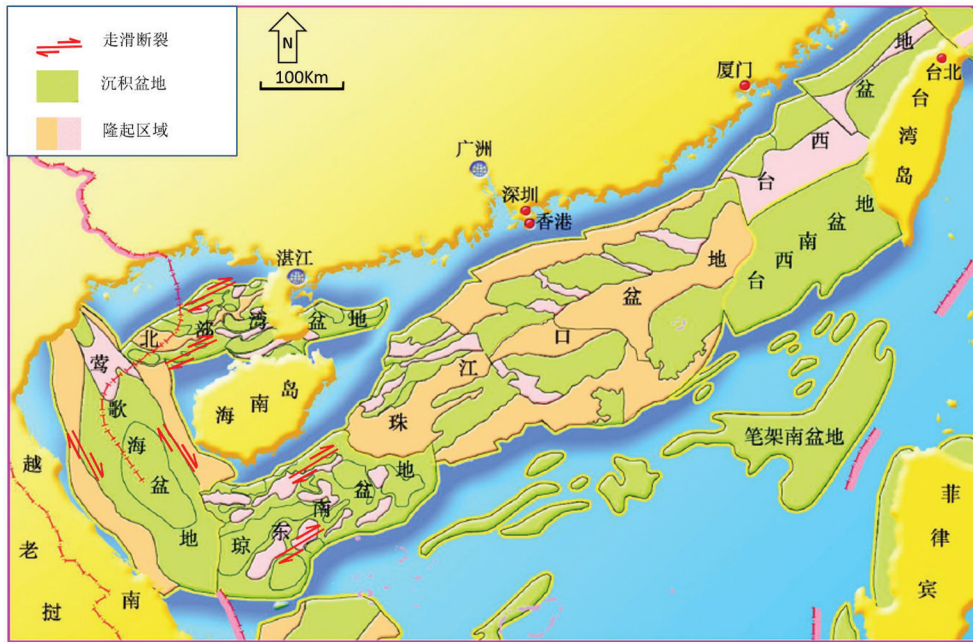


图7 环绕海南岛的3个盆地分布及其成因分析(底图据朱伟林等,2008)

Fig.7 Distribution and genetic analysis of three basins surrounding Hainan Island (after Zhu Weilin et al., 2008)

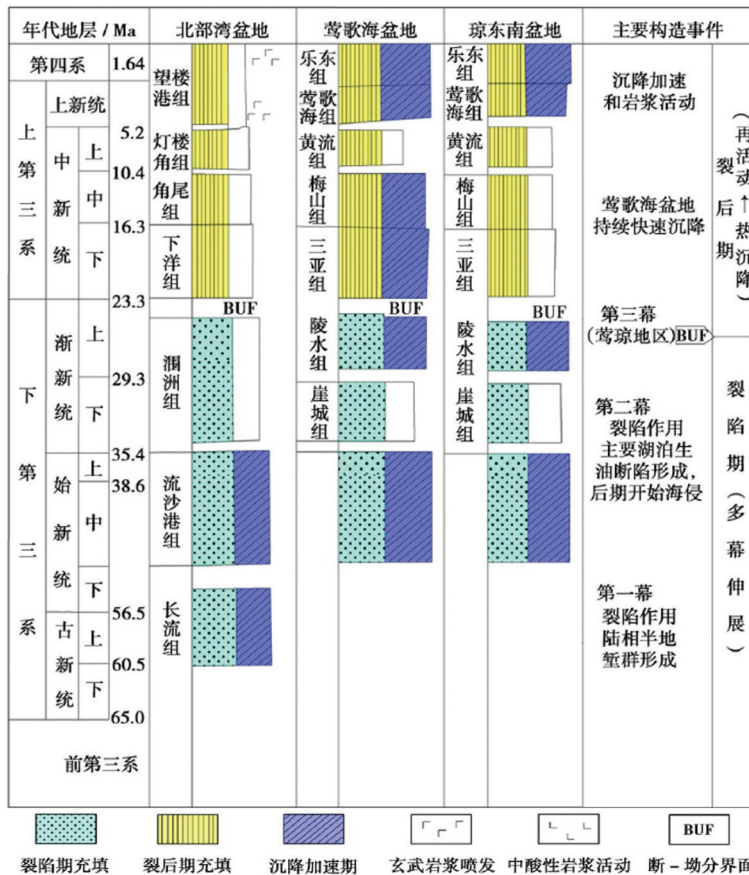


图8 南海北部大陆边缘盆地演化阶段与地层分布(朱伟林等,2008)

Fig.8 Evolutionary stages and stratigraphic distribution of continental marginal basins in northern South China Sea (after Zhu Weilin et al., 2008)

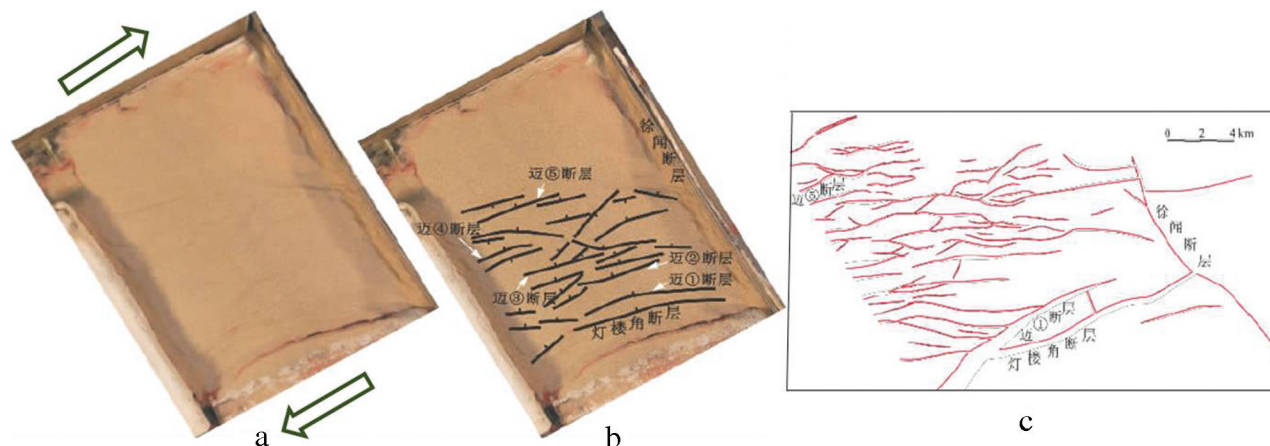


图9 北部湾盆地迈陈凹陷砂箱物理模拟实验对比

a—是实验前模型;b—是箱体加右旋力之后的断裂特征;c—是该区三维地震实测断裂特征(陈长征等,2014)

Fig.9 Comparison of sand box physical simulation experiments in the Maichen sag of the Beibu Gulf Basin

a-Pre-experimental model;b-Faults features after the box plus right-handed force;c-3D seismic measured faults characteristics of the area (after Chen Changzheng et al., 2014)

裂、莺西断裂及马江断裂发生右旋转换伸展,之后由于地幔上涌引起盆地NE-SW向的伸展。孙珍等(2003,2007)通过物理模拟说明莺歌海盆地形成机制是右旋拉分的结果。

(3)对海南岛南部的琼东南盆地,能源等(2011)的研究表明,琼东南盆地同样发育大量同期右旋走滑断裂构造,主体沿北东向展布,与盆地分布方向一致。并给出了这些走滑断裂在 seismic 勘探剖面上的典型实例,包括花状构造、雁列状断层和马尾状断层。很多正断层和走滑断层在剖面上形态近似很难区分,只能依赖整体构造环境进行综合解释。

将上述3个右旋拉分盆地的成因机制系统地描述在图7中,很清楚地说明,它们都支持海南岛的左旋成因。每个盆地都发育一系列雁状排列的走滑断裂,每个断裂的走滑距离可能并不是太大,只有数千米或数十千米,但它们组合起来就很容易使得总体走滑距离达到上百千米甚至数百千米。该拉分走滑过程也合理地解释了盆地内的隆起带,它们大多是古老的碎裂微地块。

横切琼州海峡实施过两次人工地震勘探(图10a),一条是反射地震勘探地质剖面(图10b),结果说明琼州海峡前身为一个地堑,发育一系列深切负花状断层,该海峡在约49.5 Ma之前已经开裂,其构造运动历史与其他盆地发育历史一致。另外一条是深地震测深(deep seismic sounding)速度结构剖面(图

10c),勘探结果说明海南岛深层区域10~23 km存在明显的高速和低速交替分布异常层,推测它们是海南岛旋转的滑脱层,也就是说海南岛旋转漂移的深度主要发生在10~23 km的多个层段。

7 成因机制讨论

以上诸多证据表明海南岛是从北部湾分离旋转漂移到当前位置的,其动力机制可以用李四光先生(1974)的青藏—印尼歹字型红河弧形走滑断裂拖动印支地块产生顺时针旋转运动进行合理解释,也可以用印度—欧亚碰撞所造成的逃逸构造(Tapponnier et al., 1982,1986)和地块旋转进行解释。印度板块是一个活化的克拉通板块,强度较大。欧亚大陆在向北快速漂移的相对刚性的印度大陆板块挤压下,亚洲大陆逐渐裂解,分成断块向东或东南方依次逃逸(嵇少丞等,2008; Li et al., 1995)。这种逃逸构造使印支地块自晚白垩世以来,相对于中国东部向东南发生了近千千米的漂移,同时伴随着15°左右的顺时针旋转(杨振宇等,1998)。在印支地块被挤出并发生旋转运动的过程中,地壳流也同时沿着破碎的红河断裂带深部被挤出,该力量带动了海南岛地块从华南分离,分离的薄弱地带是钦杭结合带,钦杭结合带事实上是古华夏地块和扬子地块的拼合带。这个过程造成了海南岛发生150°逆时针旋转(图11a)。印支地块被强

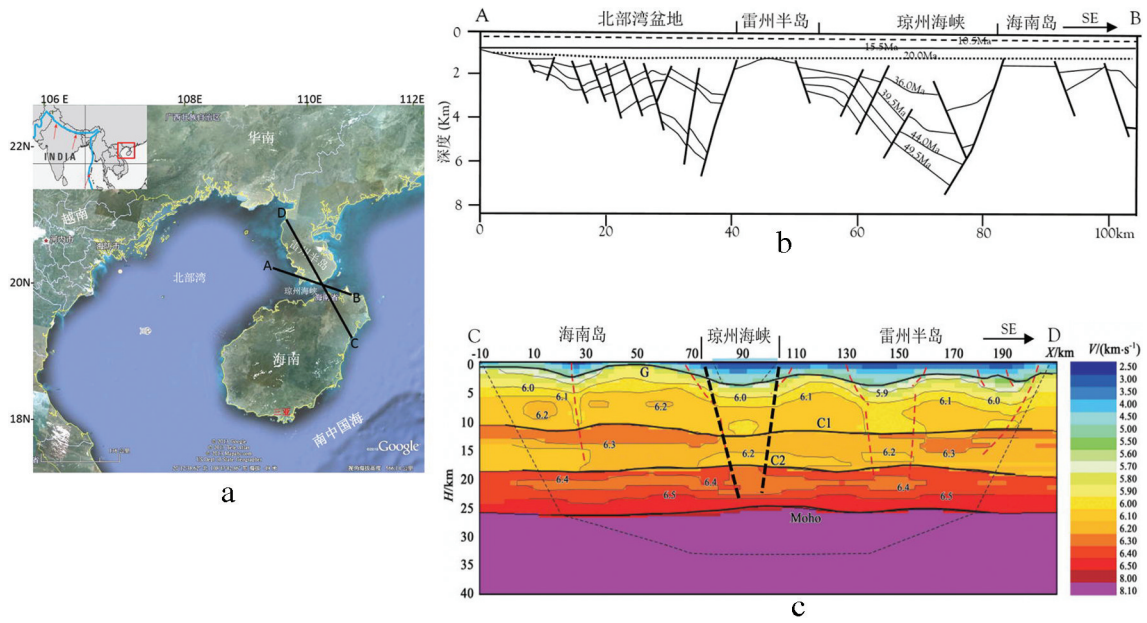


图10 横跨琼州海峡的地震勘探剖面位置(a)及人工反射地震勘探剖面N038(b) (据张亮,2012)和深地震测深速度结构剖面(c) (据嘉世旭, 2006)

Fig.10 The location of seismic exploration section across the Qiongzhou Strait(a), No. 38 artificial reflection seismic exploration section (b) (after Zhang Liang, 2012), Deep seismic sounding velocity structure section (c) (modified from Jia Shixu, 2006)

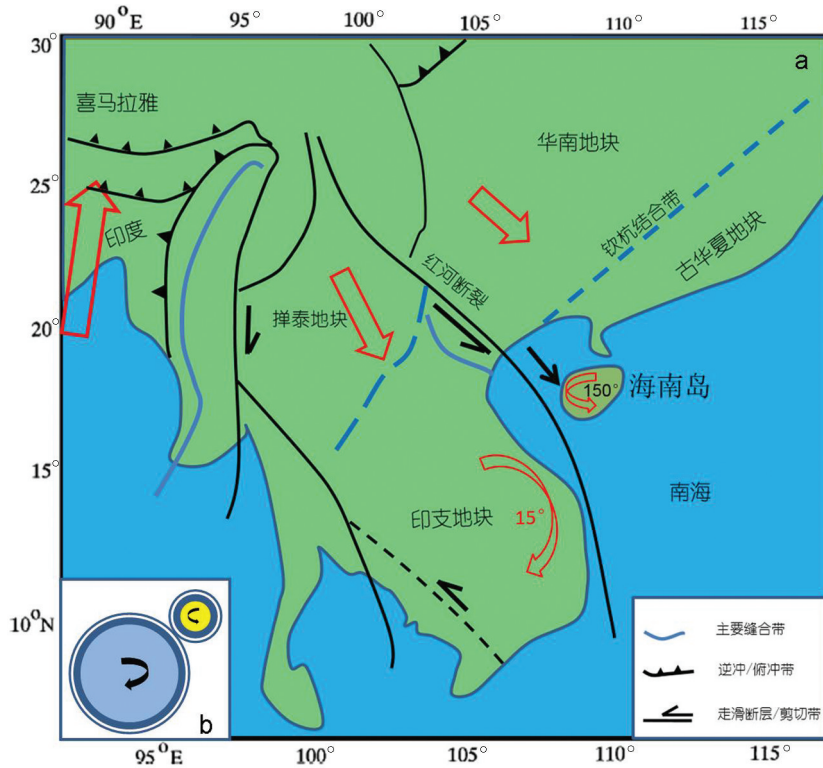


图11 海南岛区域构造简图及成因机制(a)和海南岛成因的齿轮旋转模式(b)

Fig.11 Regional structural diagram and genetic mechanism of Hainan Island(a); gear rotation mode about genetic mechanism of Hainan Island(b)

力挤出伴随着地壳流的向东南逃逸,对原处于古华夏地块最西南端凸出的海南岛产生了强烈冲击。笔者形象地把这个地质过程比喻为一个人单手劈砖,砖底下需要有一个垫板,这个垫板就是雷州半岛,这个运动过程产生的冲力把雷州半岛压弯了。这个地质过程之所以会发生,主要是由于随着深度的增加,地下地质体和岩石会发生塑性流变。使海南岛漂浮在粘稠的岩浆上,类似陀螺一样发生旋转和漂移。陈国能等(2017)的研究表明,根据全球平均地温梯度 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,部分熔融和全熔融区域主要发生在中地壳。钟大赉等(2000)综合滇川西部特提斯带现今地表构造格局、地壳和上地幔三维速度图像再解释,提出上地壳、中下地壳、岩石层地幔的构造是一种多向层架构造,上地壳与中下地壳间是一个区域性构造滑脱面。由此推测印支地块的逃逸和海南岛的漂移旋转可能主要发生在中上地壳层。这个结论与地球物理得到的“海南岛转漂移的深度主要在发生在 $10\sim 23\text{ km}$ 之间”是一致的。或者我们把这个动力机制理解为,印支地块沿红河断裂发生右旋的过程中,带动海南岛发生左旋。李四光(1962)将这种走滑断裂拖动机制形象地比喻为齿条带动齿轮旋转,即在两条平行走滑断裂之间,出现同向旋转并列连环的旋转构造(图11b)。

从海南岛主体旋转漂移发生在 $40\sim 24\text{ Ma}$,可以进一步推测印度-欧亚硬碰撞发生在 $40\sim 24\text{ Ma}$,之前的 $65\sim 40\text{ Ma}$ 可能是软碰撞,之后的 $24\sim 0\text{ Ma}$ 属于后碰撞青藏高原隆升阶段。这个结论与印度欧亚碰撞的最新研究成果一致,王二七(2017)的研究表明,印度与欧亚大陆的汇聚经历了3个阶段,即早期的水平走滑汇聚($72\sim 65\text{ Ma}$)、初始碰撞($(45\pm 5)\text{ Ma}$)和晚期的陆内汇聚($(30\pm 5)\text{ Ma}$)。

由于海南岛和华南之间存在琼州海峡,地震勘探表明,琼州海峡 49.5 Ma 之前已经开裂,说明海南岛很早就开始脱离华南,但海南岛最终什么时间完全脱离华南往往取决于地理上的认识,那就是琼州海峡的海水是否存在,也取决于海平面的变化。我们知道,琼州海峡当前平均水深 44 m ,最大深度 114 m 。在漫长的地质历史过程中,由于全球海平面变化巨大,加之海南岛的旋转运动,琼州海峡可能发生多次干涸又多次充水。海南岛最终分离华南大陆的时间就是琼州海峡最后一次充水的时

间。对琼州海峡最后的充水时代前人也通过古生物等进行了详细研究(赵焕庭等,2007),结论是在 $10570\sim 7125\text{ a}$ 前,琼州海峡随着全球海平面的上升最后一次充水。另外,根据海口地质公园玄武岩的最新年龄显示,最后一期玄武岩喷发在大约 8 ka 前,因此推测琼州海峡很可能是在大约 8 ka 前随着玄武岩的喷发,地质运动使琼州海峡进一步发生沉降,伴随着该时期的全球海平面上升,使得琼州海峡水位逐渐上升。推测在晚更新世开始,由于冰期来临,全球变冷,海平面不断下降,最后一个大冰期大约发生在 15 ka 前,此时虽然海南岛已经与大陆分离,但仍似连非连,中间可能存在非常狭窄的海峡,当时的全球海平面下降了 $120\sim 140\text{ m}$ 。在这个时期很有可能使海南岛与大陆完全相连,华南的大型动物可以迁徙到海南岛。

事实上,海南岛的形成与南海的形成是同步的,南海的打开过程与印支地块和海南岛挤出漂移过程具有同样的动力机制。也就是说地表地貌特征与海底地质过程具有内在的联系。

8 结 论

海南岛裂解漂移和旋转的动力机制与印度欧亚碰撞密切相关,该碰撞过程的远程效应造成了古华夏地块的裂解。海南岛是从古华夏地块西南端分离裂解出去的,也就是说海南岛是从北部湾分离旋转漂移到当前位置的,最初的裂解时间约为 65 Ma ,大规模的旋转发生在 $40\sim 24\text{ Ma}$,琼州海峡前身是一个长期活动的地堑,其中发育一系列深切断层。琼州海峡最后一次充水时间大约是 8 ka 前。海南岛的旋转漂移深度在 $10\sim 23\text{ km}$ 。

致谢:审稿专家和编辑老师对本文的修改提出了大量有益的建议,谨此致谢。

参考文献

- Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 20(10):895-898.
- Chen Changzheng, Chen Wei, Wu Feng, Chen Wei, Zhou Jinfeng. 2014. Structural physical simulation research of eastern Maichen sag[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(4):516-522(in Chinese with English abstract).
- Chen Guoda. 1956. Examples of Chinese platform and Discussions of

- "Cathaysia"[J]. *Acta Geologica Sinica*, 36(3):239–271(In Chinese).
- Chen Guoneng, Wang Yong, Chen Zhen and Peng Zhuolun. 2017. Advance and consideration on the mechanism of formation and emplacement of granitic magma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1489–1497(in Chinese with English abstract).
- Chen Haihong, Sun Shu, Li Jiliang, Maia Haag Jon Dobson, Xu Jinghua, Friedrich Heller. 1994. Paleomagnetism and tectonics of South China in Early Triassic[J]. *Chin. J. Geol.*, 29 (1): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuqi. *China Geological Map(1: 5000000)(Second Edition)[M]*. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- Chung S L, lee Tyloch. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the AilaoShan–Red River shear Zone[J]. *Geology*, 25(4):311–314.
- Cung T C, John W. Geissman. 2013. A review of the paleomagnetic data from Cretaceous to Lower Tertiary rocks from Vietnam, Indochina and South China, and their implications for Cenozoic tectonism in Vietnam and adjacent areas[J]. *Journal of Geodynamics*, 69:54–64.
- Gary A. Glatzmaier. 2013. *Geomagnetism[M]*. University of California, Santa Cruz.
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer–based reconstructions, model and animations[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 20(4):353–431.
- Hou Wei. 1992. Basic characteristics of crustal evolution in Hainan Island, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 16(2):131–140(in Chinese).
- Hsu Kenneth J, Li Jiliang, Chen Haihong. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 183:9–39.
- Ji Shaocheng, Wang Qian, Sun Shengsi, Xu Zhiqin, Li Haibing. 2008. Asian continent escape structure and seismic activity in China today[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(12):1644–1667(in Chinese with English abstract).
- Jia Shixu, Li Zhixiong, Xu Zhaofan, Shen Fanluan, Zhao Wenjun, Dun Yonghong. 2006. Crustal structure features of the Leiqiong depression in Hainan Province[J]. *Chinese J. Geophys.*, 49(5): 1385–1394(in Chinese with English abstract).
- Lee T Y, Lawver L A. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 251(1/4):85–138.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Zhong Dalal, Liu Xiaohan, Zhang Liangshang, Ji Shaocheng. 1995. The AilaoShan–Red River shear zone(Yunnan China): Key element of the Tertiary deformation of southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 251:1–84.
- Leloup P, Arnaud N, Lacassin R, Kienast J, Harrison T, Trong T, Replumaz A, Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan–Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(B4):6683–6732.
- Li Chunrong, Zhang Gongcheng, Liang Jianshe, Zhao Zhigang, Xu Jianyong. 2012. Fault structure in Beibu Gulf and its controlling effects over gas and oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33(2):195–203(in Chinese with English abstract).
- Li Shihu, Eldert L Advokaat, Douwe J J van Hinsbergen, Mathijs Koymans, Deng Chenglong, Zhu Rixiang. 2017. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic–Cenozoic paleolatitudinal and rotational history of Indochina and South China: Review and updated kinematic reconstruction[J]. *Earth–Science Reviews*, 171: 58–77.
- Li Siguang. 1962. *Introduction to Geomechanics[M]*. Beijing: Science Press, 228(in Chinese).
- Li Siguang. 1974. *Rotation Shear Structure [M]*. Beijing: Science Press, 83(in Chinese).
- Li Sitian, Zhang Qiming. 1997. Basin forming mechanism and its dynamics types[C]//Gong Zaosheng Li Sitian, Wang Shanshu(eds.). *Continental Margin Basin Analysis and Hydrocarbon Accumulation of the Northern South China Sea[M]*. Beijing: Science Press, 111–121(in Chinese).
- Li Zhengxiang, Ian Metcalfe, Wang Xiaofeng. 1995. Vertical–axis block rotations in southwestern China since the Cretaceous: New paleomagnetic results from Hainan Island[J]. *Geophysical Research Letters*, 22(22):3071–3074.
- Liang Guanghe. 2013. Eight evidences about Hainan Island separated from China's Beibu Gulf with drifting and rotation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87 (Supp.):73–76(in Chinese).
- Liu Yuyan, Morinaga. 1999. Cretaceous palaeomagnetic results from Hainan Island in south China supporting the extrusion model of Southeast Asia[J]. *Tectonophysics*, 301(1/2):133–144.
- Ma Lifang. 2002. *Atlas of Chinese Geology[M]*. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Metcalfe I, Sherggold I H, Li Z X. 1993. Gondwana dispersion and Asian accretion: Field work on Hainan Island[J]. *IGCP 321 Episodes*, 16:443–447.
- Morley C K. 2012. Late Cretaceous–Early Palaeogene tectonic development of SE Asia[J]. *Earth–Science Reviews*, 115:37–75.
- Neng Yuan, Wu Jingfu, Qi Jiafu, Zhang Gongcheng, He Yuping, Su Kelou, Liao Jing. 2011. Structural styles and distribution features in the deep water of the Pearl River Mouth and Qiongdongnan basins[J]. *Nature Gas Industry*, 31(8):32–37(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Jin Xiaochi. 1996. New observations of the Red River Fault[J]. *Geological Review*, 42(5):439–442(in Chinese with English abstract).
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks[J]. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 108 (B6). <http://dx.doi.org/10.1029/2001jb000661>
- Royden L, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological

- evolution of the Tibetan plateau[J]. *Science*, 321(5892):1054–1058.
- Sun Zhen, Zhong Zhihong, Zhou Di, Qiu Xuelin, Wu Shimin. 2003. Deformation mechanism of Red River Fault Zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin formation[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2):1–9(in Chinese with English abstract).
- Sun Zhen, Zhong Zhihong, Zhou Di. 2007. The analysis and analogue modeling of the tectonic evolution and strong subsidence in the Yinggehai Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3):347–356(in Chinese with English abstract).
- Takemoto K, Halim N, Otofujii YI, Tran V T, Le V D, Hada S. 2005. New paleo-magnetic constraints on the extrusion of Indochina: Late Cretaceous results from the Song Da terrane, northern Vietnam[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 229:273–285.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia[C]//Coward M, Ries A(eds.). *Collision Tectonics*. Geological Society of London Special Publication, 19:115–157.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia New Insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10:611–616.
- Wan Tianfeng. 2011. *Geotectonics of China*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1–501(in Chinese with English abstract).
- Wang E, Meng K, Su Z, Meng Q, Chu J J, Chen Z, Wang G, Shi X, Liang X. 2014. Block rotation: Tectonic response of the Sichuan basin to the southeastward growth of the Tibetan Plateau along the Xianshuihe–Xiaojiang fault[J]. *Tectonics*, 33:686–717. doi:10.1002/2013TC003337.
- Wang E C. 2017. A discussion on the timing of the initial collision between the Indian and Asian continents[J]. *Science China: Earth Sciences*, doi:10.1007/s11430-016-5136-3.
- Xu Deru, Chen Guanghao, Xiao Bin, Chen Tao. 2003. Comment on several important basic geological problems in Hainan Island, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 22(4): 37–44(in Chinese).
- Xu Zhengyu, Yu Guang, Wu Weiqiang, Ma Qinlin, Huang Ling, Xiong Shaoyun, Cheng Gang. 2014. Structural features and controlling on oils in south eastern Beibu Gulf Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(2):144–152(in Chinese with English abstract).
- Xu Yang, Lin Siliang, He Jiekun, Xin Yu, Zhang Linxiao, Jiang Haisheng, Li Yiming. 2016. Tropical birds are declining in the Hainan Island of China[J]. *Biological Conservation*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.029>
- Yan Jiaan. 2006. Quaternary Paleontology and ecological evolution in Hainan Island[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18 (1):103–114(in Chinese with English abstract).
- Yang Shufeng, Yu Ziyi, Guo Lingzhi, Shi Yangshen. 1989. Terrane division, paleomagnetic studies and plate tectonic significance of Hainan Island[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Science)*, 1 (1/2):38–46(in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Besse J. 1993. Paleomagnetic study of permain and Mesozoic sedimentary rocks from north Thailand supports the extrusion model for Indochina[J]. *Earth Science Planet. Sci. Lett.*, 117:525–552.
- Yang Zhenyu, Jean Besse, Sun Zhiming, Zhao Yue. 1998. Tertiary tectonic slip in Indo–China Block and lithosphere tectonic evolution in Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72 (2):112–125(in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, Peng Yuanqiao. 1999. South China is part of the Tethys Ocean archipelago system[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1):1–11(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinjie, Chen Fuxiong, Wang Yonghui, Liang Jiang, Che Linrui. Origin and rock-forming environment of the granitoids in the periphery of the Shilu iron deposit[J]. *Geology in China*, 2012, 39 (6): 1700–1711(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liang. 2012. *Tectonic Evolution of the South China Sea and a Numerical Modeling*[D]. Beijing, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 79–79(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng. 1991. *Hainan Island Geology (Chapter 3: Tectonic)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 3–29(in Chinese).
- Zhang Qimeng, Hap Fang. 1997. Evolution and hydrocarbon system in Ying–Qiong basin[J]. *Science in China(Series D)*, 27(2):149–154 (in Chinese).
- Zhang Yeming, Xie Caifu, Fu Tai'an, Li Zhihong. 2005. Tectonic evolution of Hainan Island[J]. *Science Technology and Engineering*, 5(20):1485–1487(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guoqiang, Su Xiaoning. 2014. Present-day crustal movement velocity field in Mainland China derived from GPS observations[J]. *Earthquake*, 30(1):97–103(in Chinese with English abstract).
- Zhao Huanting, Wang Lirong, Yuan Jiayi. 2007. Origin and time of Qiongzhou strait[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 33–40(in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai, Ding Lin, Liu Futian, Liu Jianhua, Zhang Jinjiang, Ji Jianqing, Chen Hui. 2000. The multi-axial shelf structure of lithosphere in the orogenic belt and its constraints on the magmatism in the Cenozoic era with example of Sanjiang and neighboring zoning[J]. *Science in China(Series D)*, 30 (supp.): 1–8 (in Chinese).
- Zhu Hua. 2016. Biogeographical evidences help revealing the origin of Hainan Island[J]. *PLoS ONE* 11(4): e0151941. doi:10.1371/journal.pone.0151941.
- Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. 2008. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1):1–9(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈国达. 1956. 中国地台活化区的实例并着重讨论“华夏古陆”问

- 题[J]. 地质学报, 36(3):239-271.
- 陈国能, 王勇, 陈震, 彭卓伦. 2017. 花岗岩浆形成定位机制的思考和研究进展[J]. 岩石学报, 33(5):1489-1497.
- 陈海泓, 孙枢, 李继亮, Maia Haag Jon Dobson, 许靖华, Friedrich Heller. 1994. 华南早三叠世的古地磁学与大地构造[J]. 地质科学, 29(1):1-9.
- 陈长征, 陈伟, 吴峰, 成为, 周进峰. 2014. 北部湾盆地迈陈凹陷东部构造物理模拟研究[J]. 石油实验地质, 36(04):516-522.
- 程裕淇. 中国地质图(1:500万)(第二版)[M]. 北京:地质出版社, 2002.
- 侯威. 1992. 海南岛地壳演化的基本特征[J]. 大地构造与成矿学, 16(2):131-140.
- 稽少丞, 王茜, 孙圣思, 许志琴, 李海兵. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报, 82(12):1644-1667.
- 嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 沈繁鑫, 赵文俊, 段永红. 2006. 雷琼拗陷地壳结构特征[J]. 地球物理学报, 49(5):1385-1394.
- 李春荣, 张功成, 梁建设, 赵志刚, 徐建永. 2012. 北部湾盆地断裂构造特征及其对油气的控制作用[J]. 石油学报, 33(2):195-203.
- 李四光. 1962. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社, 228.
- 李四光. 1974. 旋扭构造[M]. 北京:科学出版社, 83.
- 李思田, 张启明. 1997. 盆地形成机制及其动力学类型. 龚再升, 李思田, 王善书, 著. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京:科学出版社, 111-121.
- 梁光河. 2013. 海南岛从中国北部湾分离旋转漂移出去的8大证据[J]. 地质学报, 87(增刊):73-76.
- 马丽芳. 2002. 中国地质图集[M]. 北京:地质出版社.
- 能源, 吴景富, 漆家福, 张功成, 何玉平, 苏克露, 廖晶. 2011. 琼东南—珠江口盆地深水构造样式及其分布特征[J]. 天然气工业, 31(8):32-37.
- 任纪舜, 金小赤. 1996. 红河断裂的新观察[J]. 地质论评, 42(5):439-442.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂, 丘学林, 吴世敏. 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. 热带海洋学报, 22(2):1-9.
- 孙珍, 钟志洪, 周蒂. 2007. 莺歌海盆地构造演化与强烈沉降机制的分析和模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3):347-356.
- 万天丰. 2011. 中国大地构造[M]. 北京:高等教育出版社:1-501.
- 王二七. 2017. 关于印度与欧亚大陆初始碰撞时间的讨论[J]. 中国科学:地球科学, 47:284-292.
- 汪啸风. 1991. 海南岛地质(三):构造地质[M]. 北京:地质出版社:3-29.
- 徐政语, 俞广, 吴炜强, 马庆林, 黄羚, 熊绍云, 程刚. 2014. 北部湾盆地东南部构造特征及控油作用分析[J]. 石油实验地质, 36(2):144-152.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 陈涛. 2003. 海南岛几个重大基础地质问题评述[J]. 地质科技情报, 22(4):37-44.
- 颜家安. 2006. 海南岛第四纪古生物及生态环境演变[J]. 古地理学报, 18(1):103-114.
- 杨树锋, 虞子冶, 郭令智, 施央申. 1989. 海南岛的地体划分、古地磁研究及其板块构造意义[J]. 南京大学学报(地球科学), 1(1/2):38-46.
- 杨振宇, Jean Besse, 孙知明, 赵越. 1998. 印度支那地块第三纪构造滑移与青藏高原岩石圈构造演化[J]. 地质学报, 72(2):112-125.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 24(1):1-11.
- 余金杰, 陈福雄, 王永辉, 梁将, 车林睿. 2012. 海南石碌铁矿外围花岗岩类成因及形成的构造环境[J]. 中国地质, 39(6):1700-1711.
- 张亮. 2012. 南海构造演化模式及其数值模拟[D]. 北京:中国科学院研究生院博士论文, 79-79.
- 张启明, 郝芳. 1997. 莺—琼盆地演化与含油气系统[J]. 中国科学(D), 27(2):149-154.
- 张业明, 谢才富, 付太安, 李志宏. 2005. 海南岛地质构造演化刍论[J]. 科学技术与工程, 5(20):1485-1487.
- 赵国强, 苏小宁. 2014. 基于GPS获得的中国大陆现今地壳运动速度场[J]. 地震, 30(1):97-103.
- 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义. 2007. 琼州海峡成因与时代[J]. 海洋地质与第四纪地质, 27(2):33-40.
- 钟大赉, 丁林, 刘福田, 刘建华, 张进江, 季建清, 陈辉. 2000. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动制约——以三江及邻区划为例[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊):1-8.
- 朱伟林, 张功成, 高乐. 2008. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 29(1):1-9.